

## ANÁLISIS DE IMPACTOS AMBIENTALES EN LA CUENCA DEL JEQUETEPEQUE, PERÚ, PRODUCIDOS POR ACTIVIDADES MINERAS

**Cristina Yacoub López\*, Agustí Pérez-Foguet\*\*, Núria Miralles Esteban\*\*\***

Grup de Recerca en Cooperació i Desenvolupament Humà, GRECDH

GRECDH - Dept. EQ, ETSEIB. Avda. Diagonal 647 08028 - Barcelona Spain \*, \*\*\*

GRECDH-LACAN, Dept. MA3, ETSECCPB. Jordi Girona, 31 08034 - Barcelona, Spain\*\*

Pàgina web: <http://www.upc.edu/grecdh/>

Cristina.yacoub@gmail.com \*, agusti.perez@upc.edu\*\*, nuria.miralles@upc.edu\*\*\*

**Paraules clau:** (Contaminació, Cooperació, BCR, SWAT, DHS)

### RESUM

El objetivo general es el estudio de la movilización de los metales pesados bajo distintas condiciones medioambientales así como la relación existente entre la movilización y las características químicas en el agua superficial de la cuenca alta del Jequetepeque, Perú, evaluando las distintas aportaciones de metales pesados por las empresas mineras ubicadas en la parte de recarga de la cuenca. La cuenca del Jequetepeque es fuente de conflictos debido a la percepción de la población local de escasez y mala calidad del agua, asociada a la minería, frente a la ausencia del estado y la manipulación de la información por parte de los medios de comunicación

Para ello, se desarrolla una etapa inicial que consta de un programa de control medio ambiental así como la caracterización hidromorfológica de la cuenca. Se ha realizado la primera campaña del programa de control en los puntos seleccionados por estimarse lugares de mayor concentración de metales pesados, que incluye el análisis de la calidad de agua y sedimentos mediante extracción química selectiva propuesta por BCR (European Community Bureau of Reference)

Por otra parte la caracterización hidrológica de la cuenca se ha realizado mediante el modelo de simulación "Soil and Water Assessment Tool" (ArcSWAT 2005) confiriendo una visión integral del recurso hídrico, puesto que permite simular la gestión de la cuenca. Es decir, mediante el modelo se pueden estimar las aportaciones de los distintos usos de suelo y actividades productivas a la cuenca. Además resulta posible tratar la contaminación difusa en el modelo, permitiendo así evaluar los impactos en los distritos hidrográficos.

Finalmente, se prevé estimar los riesgos en la salud y medio ambiente a partir de la estimación de la movilidad de metales de los sedimentos al agua mediante los datos de los análisis y las aportaciones del SWAT, así como el diseño de medidas aplicadas para la eliminación de metales en el agua de abastecimiento en zonas rurales.

El estudio se sustenta bajo la premisa de que los estudios técnicos no se presentan únicamente como herramientas para el conocimiento, sino como base de un trabajo de difusión y denuncia de acciones realizadas sobre el medio ambiente de forma fundamentada. En este sentido, y gracias a la actuación de la ONGD GRUFIDES (Grupo de Formación e Intervención para un Desarrollo Sostenible, es una de las instituciones asociadas al proyecto de investigación de agua y saneamiento a escala rural del GRECDH), se están llevando a cabo procesos divulgativos y de desarrollo de capacidades por parte de la población afectada, especialmente en la campaña de recogida de muestras e interpretación de resultados, confiriendo un mayor énfasis al conocimiento de los riesgos existentes.

## INTRODUCCION

La parte alta de cuenca del Jequetepeque (correspondiente a la zona de captación hasta la represa del Gallito Ciego), comprende diversos centros mineros de diferente ubicación, envergadura y temporalidad.

Las concesiones mineras ocupan 2.186,35 km<sup>2</sup>, es decir, el 36.8 % de la extensión total de la cuenca. Predomina la explotación de minerales met licos: plata, oro, plomo, cobre, hierro representando a las tres cuartas partes de las empresas mineras y cubriendo una extensión de 193,454.22 Ha, representando un 88.52%(como se puede observar en la figura 1, donde la región amarilla son concesiones auríferas y la región azul polimetálica. Mientras que las no met licos (calizas, yeso, marmolina, caolín,  nix, mármol, sílice) representan el 11.48% (25,087.57 Ha).

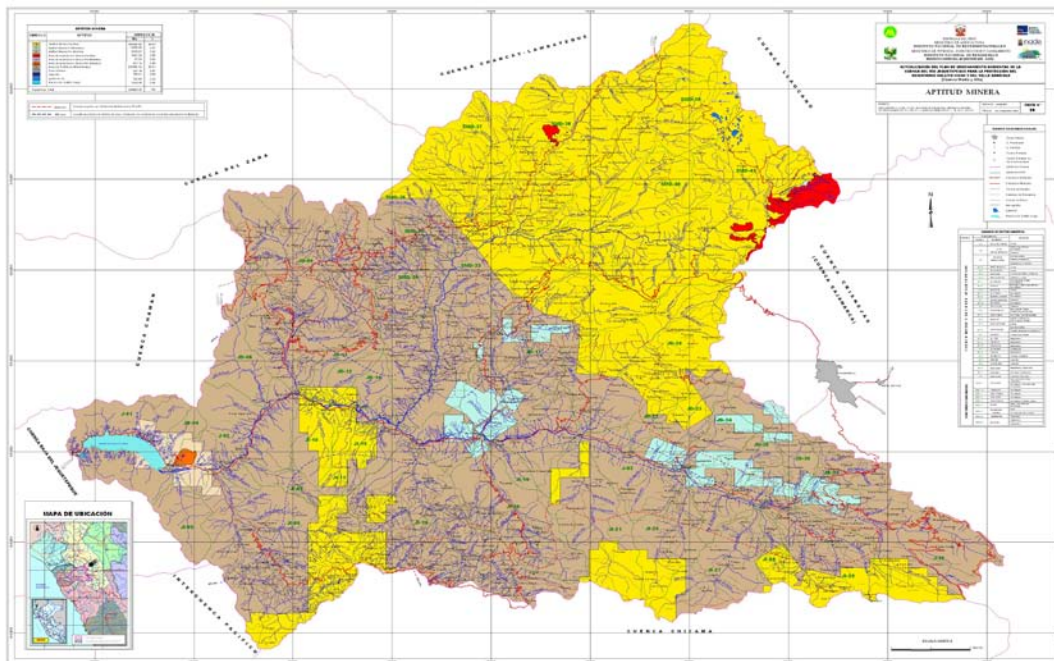


Figura 1: Mapa de concesiones mineras en la parte alta de la cuenca del Jequetepeque.

Fuente: Actualización del Plan de Ordenamiento Ambiental para la protección del reservorio Gallito Ciego y del valle agrícola. Año 2003

Asimismo, se conoce la presencia de metales pesados en el agua en zonas cercanas a los emplazamientos mineros pasados y actuales, a partir de los monitoreos estatales realizados y estudios independientes como *stratus consulting*. También se han realizado algunos estudios por parte de la administración y las universidades en relación a la contaminación del agua en la cuenca concluyendo que la calidad del agua est  relacionada directamente con las actividades antropológicas, resaltando la minera y que en la época de lluvias se produce la remoción de sustancias tóxicas presentes en la cuenca elevando su concentración y restringiendo su uso.

Sin embargo, no existen estudios específicos sobre la presencia de metales pesados en agua y sedimentos, ni la afectación producida a nivel de cuenca. Es por ello que se pretende llevar a cabo el estudio sobre la movilización de los metales pesados, para poder elucidar sobre la contaminación existente en la cuenca a partir de la estimación de la dinámica, distribución y contribución de dichos metales a partir de cada emplazamiento minero en la cuenca y así, tener un primer mecanismo de evaluación de los posibles impactos generados.

## MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE IMPACTOS

La contaminación del suelo por metales pesados est  fundamentalmente relacionada con diferentes tipos de actividades humanas. Una vez en el suelo, los metales pesados pueden quedar retenidos en el mismo pero también pueden ser movilizados en el suelo mediante diferentes mecanismos biológicos y químicos [1]. Más del 90% del total de la carga de los metales pesados los ríos son transportados en fase sólida, es por lo que monitorear la calidad de sedimento del río resulta relevante [2]. Para elucidar el comportamiento de los metales pesados en los suelos y prevenir riesgos tóxicos potenciales se requiere la evaluación de la disponibilidad y movilidad de los mismos. Tradicionalmente el método empleado para llevar a cabo los estudios de movilización de metales pesados en agua-sedimento se basa en los estudios de especiación, a través de métodos de fraccionamiento operacional como son las extracciones químicas selectivas, simples y/o secu nciales, ya que la determinación directa es casi imposible [3]. Para el análisis en emplazamientos mineros a nivel de cuenca, es conveniente integrar la química del agua con la calidad de los sedimentos de la corriente del lecho de fondo y con la biología acuática [4] y también se debe analizar la contaminación de metales transportados corrientes abajo [5].

## CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS. DISTRIBUCIÓN Y MODELAJE

La distribución de la contaminación en el suelo y agua se puede clasificar como contaminación local que mediante erosión, tanto hídrica como eólica, transporta y deposita el material soluble y particulado, convirtiéndolo así en un tipo de contaminación difusa. Por ello, resulta relevante la determinación del transporte y destino de los metales traza a partir de los procesos de interacción hidrológica y geoquímica. Además, se debe tener en cuenta la complejidad de estos procesos causada por su variación espacial y temporal en los procesos más relevantes [6]. La dispersión longitudinal de los metales disueltos es controlada por mecanismos de remoción química inmediatamente después de la confluencia con el primer río y por dilución física con los flujos de los tributarios corriente abajo. La distribución espacial y la ocurrencia de concentraciones de elementos traza se define sobre un área geográfica y provee un reflejo del río como sistema integral y continuo [5].

Comparando los ratios de transporte hidrológico con las reacciones químicas, se observa que las reacciones sólo son importantes a distancias cortas cerca de los flujos ácidos donde las reacciones ocurren a un tiempo de escala comparable al transporte hidrológico y por lo que pueden afectar a la concentración de metales. Si los ratios de las reacciones biogeoquímicas son rápido con respecto a los ratios de transporte, son las reacciones biogeoquímicas las que afectan a las concentraciones de metales en la corriente de flujo. Mientras que, si el transporte hidrológico es más rápido que las reacciones biogeoquímicas, el transporte del soluto aparece como conservativo en lugar de reactivo. En concreto, en las regiones montañosas, resultan especialmente complejo por la distribución espacial de la velocidad del agua y por el control de las reacciones químicas debido al grado de interacción entre sedimentos y agua a escala local, la intensidad de la luz o patrones con otras variables medio ambientales.

Teniendo en cuenta la importancia de una visión integral del recurso hídrico para poder estimar la dinámica de los metales a nivel de la cuenca, y la complejidad de determinar los procesos químicos en regiones montañosas, se ha considerado el modelo ArcSWAT como una herramienta que permite comprender y definir la cuenca tanto a nivel hidrológico como agrícola, incluyendo la posible afectación de est  a la

cuenca. ArcSWAT 2005 es un modelo a escala de cuenca, continuo y opera a escala diaria. El modelo es físicamente basado, utiliza datos de entrada que se pueden conseguir fácilmente, resulta computacionalmente eficiente para simulaciones larga escala especialmente en la determinación de prácticas de uso de suelo. El modelo opera a partir de la distribución de la cuenca en subcuencas, que presentan diferencias en suelo, prácticas de uso de suelo y pendiente, específicamente divide las subcuencas en función a esos tres parámetros obteniendo las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), que son las unidades de cálculo del modelo [7].

## METODOLOGÍA

### 1. Metodología en el monitoreo.

El objetivo inicial es el análisis de unas zonas específicas:

- La subcuenca del Rejo, naciente en la zona de "las lagunas" y en las operaciones de minera Yanacocha .
- La subcuenca del Llapa, en la zona aledaña a la minera clausurada de Sipán

Para su consecución se pretende realizar los siguientes objetivos específicos:

- Caracterización hidromorfológica de la cuenca
- Monitoreo medio ambiental: Análisis de agua y sedimentos en los puntos seleccionados, incluyendo: la especiación o extracción química selectiva. Estos controles deben establecerse, como mínimo, por duplicado y en época seca y de lluvias.
- Evaluación de los impactos en distritos hidrográficos y estimación de riesgos (a partir del estudio de la movilización de los metales encontrados en los análisis y la dinámica de la cuenca)
- Diseño de medidas adecuadas de remoción de metales en el agua

Los metales seleccionados para el estudio son Al, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Fe, Mn, Pb, Ni, Zn, Sb y Sn. Su selección se realizado en base a los siguientes criterios:

- Su toxicidad y disponibilidad en el ambiente y en los organismos acuáticos, teniendo en cuenta los elementos de mayor movilización
- Por su importancia al formar sorbentes potenciales (hidróxidos de Al y Fe, y óxidos de Mn)
- Metales y no metales que aparecen en concentración superior a la normal por causas antropológica en estudios anteriores.

Por otra parte, la evaluación de impactos en la cuenca se evaluar  en un futuro con la comparación de los resultados del monitoreo obtenidos con algunas guías de calidad de aguas de OMS o calidad de sedimentos de USEPA [4].

### 2. Metodología en el proceso de modelación

Para la modelación de la cuenca se han seguido tres pasos:

- El procesamiento de datos
- La utilización del modelo en si para datos de cuatro años (1998-2002):
- La calibración del modelo.

El procesamiento de datos se hizo a partir de la información disponible por el proyecto CESAII [8] y la utilización del modelo comprendió diversas etapas de definición: hidrológica, de HRU, de estaciones meteorológicas y de los diferentes parámetros de entrada.

El proceso de calibración consta de diversas etapas. Primero se realiza un análisis de sensibilidad que determina el set de parámetros a calibrar mediante el método LH-OAT. Éste método combina a su vez los métodos “Latin hypercube sampling” y “One-Factor-a-Time sampling”. Esta fase es la especificación paramétrica. Una vez determinados los parámetros a calibrar se ha realizado la estimación paramétrica. En este caso, se ha utilizado la calibración automática que implica computación de la predicción del error mediante una ecuación, la función objetivo, y un procedimiento de optimización automática mediante un algoritmo. En este caso se ha utilizado la función objetivo de la suma de las raíces residuales, SSQ y un algoritmo de optimización global, el *Shuffled Complex Evolution Method*, SCE [7].

Finalmente, se estima la validez de los resultados obtenidos, verificando así el proceso de calibración. Para ello se han utilizado histogramas como técnica gráfica y como técnica cuantitativa se han estimado los parámetros adimensionales de Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE, el porcentaje de sesgo, PBIAS y el ratio de la observación de la desviación estándar, RSR [9].

## RESULTADOS

Inicialmente se ha realizado y validado un protocolo de actuación. Se ha monitoreado la cuenca del Rejo y del Llapa en los puntos que se muestran en los mapas de las figura 2 y 3.

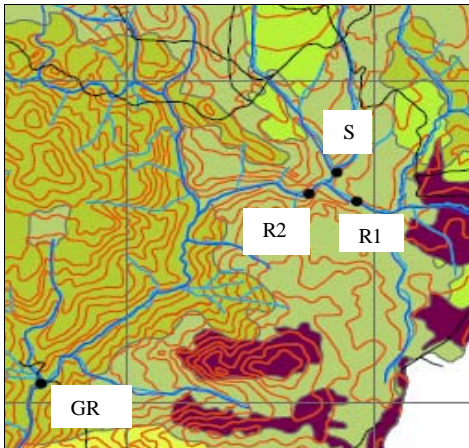


Figura 2: Mapa Cuenca del Rejo. Fuente propia

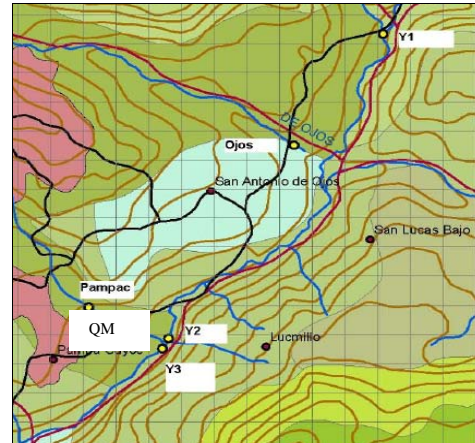


Figura 3: Mapa Cuenca del Llapa. Fuente propia

En los análisis de metales realizados en aguas procedentes de la subcuenca del Rejo, se observa un pico de concentración para el punto más cercano a la minera (R1), así como una gran diferencia con el de aguas arriba (S) en casi todos los metales analizados (Al, Fe, Mn, Cu, Pb, Zn, As). En las figuras 4 y 5 se recogen los resultados obtenidos para algunos metales.

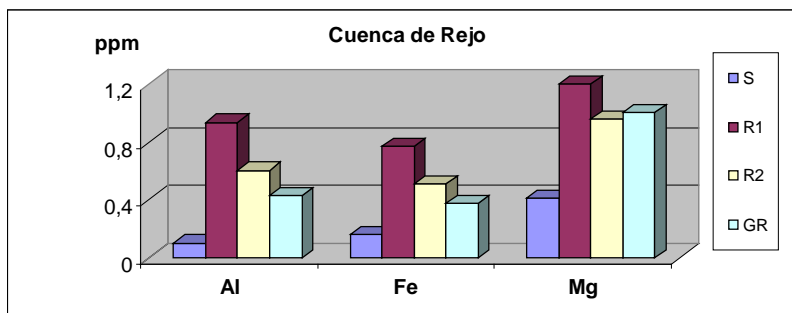


Figura 4. Concentración de aluminio, hierro y magnesio en las aguas de la cuenca del río Rejo.

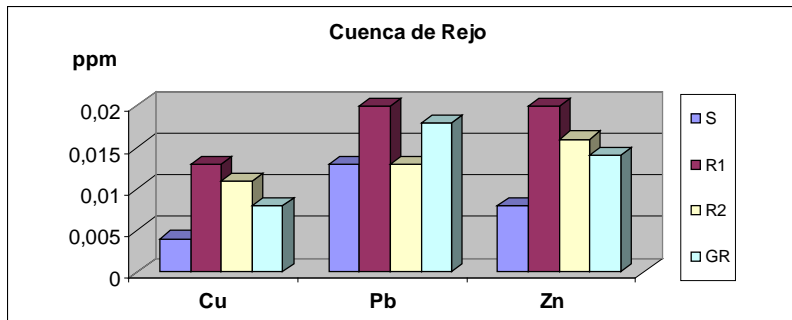


Figura 5. Concentración de cobre, plomo y zinc en las aguas de la cuenca del río Rejo.

En los análisis de metales en agua procedentes de la subcuenca del Llapa, se observa un pico de concentración para el punto más cercano a la minera para todos los metales analizados (Al, Fe, Mg, Cu, As, Cd, Ni), a excepción del zinc, como se recogen en las figuras 6 y 7.

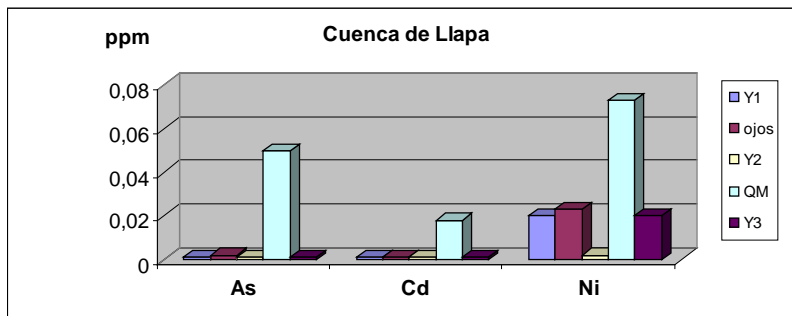


Figura 6: Concentración de arsénico, cadmio y níquel en la cuenca del Llapa.

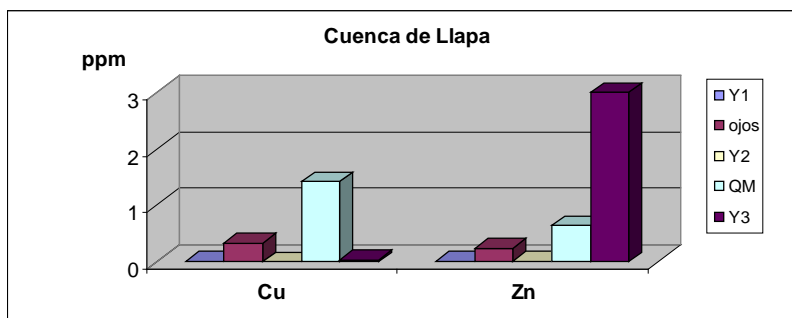


Figura 7: Concentración de cobre, y zinc en la cuenca del río Llapa.

Los análisis de sedimentos se han realizado utilizando la extracción secuencial (BCR) que fracciona a los metales según: etapa 1 fracción soluble, metales intercambiables o metales enlazados a carbonatos, etapa 2 fracción reducible o enlazada a hidróxidos de hierro y manganeso, etapa 3 fracción oxidable o enlazada a materia orgánica o soluble y etapa 4 fracción residual o litogénica. Los resultados obtenidos muestran diferentes tendencias según cada cuenca y cada metal. En las figuras 8 y 9 se recogen los análisis del cadmio en los sedimentos procedentes la cuenca del Rejo y de Llapa.



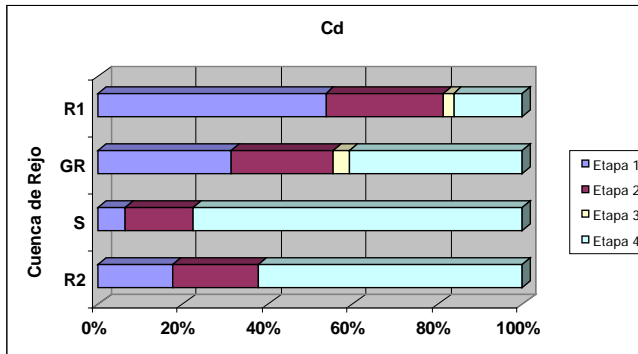


Figura 8: Análisis de sedimentos para el Cd en la cuenca de Rejo.

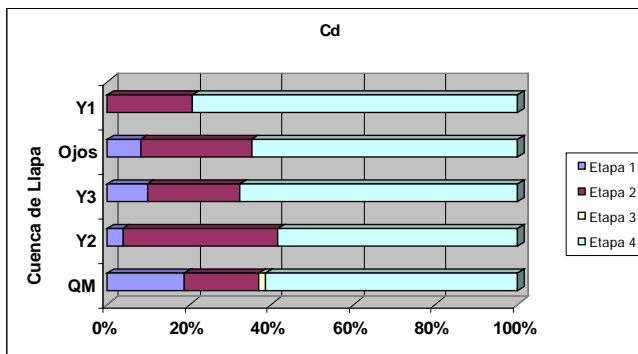


Figura 9: Análisis de sedimentos para el Cd en la cuenca de Llapa.

En el estudio preliminar de las gráficas puede observarse que en la cuenca de Rejo hay una mayor contaminación que en la de Llapa, aunque será necesario posterior tratamiento estadístico de los datos para concluir resultados.

Por otro lado, se ha discretizado la cuenca y modelado su comportamiento hidrológico mediante el programa ArcSWAT2005 durante cuatro años (1998-2002) y se ha aplicado la metodología previamente descrita para caudales diarios. Los resultados obtenidos pueden calificarse de muy buenos [9] según se puede ver en el histograma (figura 10) y los parámetros estadísticos de la tabla 1.

	NSE	RSR	PBIAS
Valores "muy buenos"	>0.75	<0.50	<10%
Simulación	0.910	0.300	0.49%

Tabla 1: Parámetros estadísticos cuantitativos.

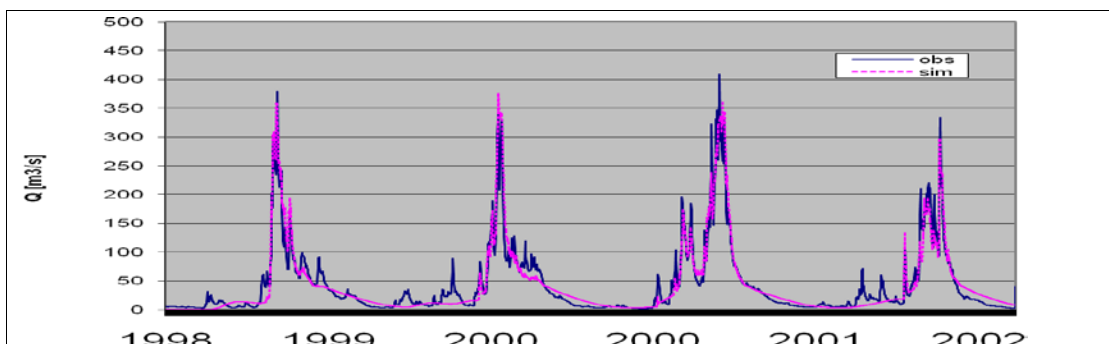


Figura 10: Histograma de los datos observados (de entrada) y los simulados para el período 1998-2002.

## CONCLUSIONES

En la calidad de agua se observa la tendencia, en ambas subcuencas, de disminuir la concentración de los metales al alejarse de las mineras.

Se necesita mejorar la toma de muestras de sedimentos para conseguir datos más representativos de cada zona.

Se amplían los lugares de monitoreo a la zona de la represa ubicada en la parte media de la cuenca.

El modelo SWAT ha permitido obtener la hidrología de la cuenca y resulta una base en la cual se debe adecuar la calidad de agua estudiada. Para ello:

- Se analizarán los resultados del monitoreo de sedimentos mediante el análisis de componentes principales, PCA. Esto permite establecer bases sobre el comportamiento de los metales diferenciando las causas antropogénicas de las naturales.
- En base a los resultados del PCA, se analizarán los puntos señalados como “hot spots” y los nuevos puntos de la represa.
- A partir de los dos monitoreos de metales, se calcular  el coeficiente de distribución para posteriores análisis de su dinámica a nivel de cuenca.
- Al tener la cuenca hidrológicamente delimitada, una vez obtenido el coeficiente de distribución, se pueden introducir al modelo SWAT los contaminantes de la campaña de monitoreo.

## Referencias

1. Pagnanelli, F., Moscardini, E., Giuliano, V., Toro, L.. Sequential extraction of heavy metals in river sediments of an abandoned pyrite mining area: pollution detection and affinity series. *Environmental Pollution*, **132**, pp. 189-201(2004).
2. Gibbs, R.J. Transport phases of transition metals in the Amazonas and Yukon rivers. *Bulletin Geological Society of America* **88**, 829-843 (1977).
3. Van Herreweghe, S., Swennen, R., Vandecasteele, C., Cappuyns, V. Solid phase speciation of arsenic by sequential extraction in Standard reference materials and industrially contaminated soil samples. *Environmental Pollution*, **122**, 323-342 (2003).
4. USEPA. Mine drainage control from metal mines in a subalpine environment. EPA-60012-77-224. (1977).
5. Gurrieri J.T. Distribution of metals in water and sediment and effects on aquatic biota in the upper Stillwater River basin, Montana. *J of Geochem. Exploration*, **64**, 83-100 (1998).
6. Runkel R., Kimball B. Evaluating Remedial Alternatives for an Acid Mine Drainage Stream: Application of a Reactive Transport. *Model Environ. Sci. Technol.*, **36**, 1093-1101 (2002).
7. Duan Q., Sorooshian S., Gupta K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, **158**, 265-2842 (1994)
8. CARE, WWF, GTZ, IIED y CEDEPAS. “Proyecto Compensaci n Equitativa por Servicios Ambientales Hidrol gicos (CESAH)”. (Febrero 2007)
- 9 D.N. Moriasi, J.G. Arnold, M.W.Vanliew, L.G. Bingner, R.D.Harmel, T.L.Veith. Model Evaluation Guidelines for a Sistematic Quantification of Accuracy in watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, **50**, 885–900 (2007).